

基于激光测量的航发叶片表面几何缺陷识别技术

孙彬¹ 王建华¹ 赫东锋¹ 杜虎兵¹ 李兵²

摘要 针对航发叶片修复检测的应用,提出了一种基于截面线一阶导矢法的叶片型面缺陷识别方法.该方法是等高线法处理测量点云中的截面数据,通过 B 样条插值函数拟合成光滑曲线;再由 B 样条曲线的一阶导矢公式求出每个测点的一阶导数,然后以点斜公式求出截面曲线上各个测点的切线;如果曲线光滑,曲线上测点的斜率变化在两端点斜率值之间,否则表明曲线上有缺陷存在;根据 k-d 树的最近点搜索算法,遍历整个叶盆(叶背)就可以找到叶盆(叶背)上的缺陷区域.通过与三坐标测量实验比对,该技术可以实现 3 μm 精度的缺陷识别.

关键词 激光位移传感器,航发叶片,测量,缺陷识别

引用格式 孙彬,王建华,赫东锋,杜虎兵,李兵.基于激光测量的航发叶片表面几何缺陷识别技术,自动化学报,2020,46(3):594–599

DOI 10.16383/j.aas.c180080

Identification of Aero-engine Blade Surface Geometric Defects With Laser Measurement

SUN Bin¹ WANG Jian-Hua¹ HE Dong-Feng¹ DU Hu-Bing¹ LI Bing²

Abstract Aimed at aero-engine blade repair detection, a method of blade surface defect identification based on the first-order cross-sectional guideline method is proposed. In this method, the cross-section data of the measurement point cloud is processed by the contour line method and the smooth curve is fitted by the B-spline interpolation function. The first-order derivative of each measuring point is obtained by the first-order derivative formula of the B-spline curve. If the curve is smooth, the slope of the measuring point on the curve changes between the slope values of the two endpoints, otherwise it indicates that there are defects in the curve. According to the nearest k-d tree point search algorithm, traversing the entire blade pot (blade back) can find the blade pot (blade back) on the defect area. By comparing with the three-coordinate measurement experiment, the technology can realize the defect identification with a 3 μm precision.

Key words Laser displacement sensor, aero-engine blade, measurement, defect identification

Citation Sun Bin, Wang Jian-Hua, He Dong-Feng, Du Hu-Bing, Li Bing. Identification of aero-engine blade surface geometric defects with laser measurement. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(3): 594–599

叶片作为航空发动机或燃气轮机的关键部件,使用的是十分昂贵的镍基和钴基高温合金材料来制造,并且运用了复杂的制造工艺,例如采用定向凝固叶片和单晶叶片,需要铣削、磨抛甚至手工打磨等多种加工手段,以航空发动机某三级压气机叶片为例,仅磨序就需要 8 个小时才能加工完成一个叶片,因

此生产制造成本非常昂贵^[1–3].叶片在高温高压环境下工作,容易产生扭转、折边、磨损、凹坑、掉块等各种几何缺陷.如果能够对这些缺陷进行准确的检测识别,然后再由专业技术进行修复,不仅可以使叶片得到二次利用延长发动机的使用寿命,也可以节约成本减少损耗达到可持续制造的目的^[4–6].因此叶片的修复技术已经得到国内外学者的高度重视,那么有必要针对修复前的叶片进行检测,以便准确找到缺陷区域及尺寸,为后续叶片型面修复提供可靠支持.

1 国内外研究现状

英、美、法等航空工业先进的国家,都在对航机叶片的修复技术、工艺研究以及装备研制等方面,投入了大量资金当然也取得了巨大的成果^[7–8].其中美国 Optomec Design 公司利用激光熔覆修复技术(Laser powder cladding)实现了对军用航空发动机零件 T700 的快速、高效的再制造^[9].德国霍夫

收稿日期 2018-02-01 录用日期 2018-07-02
Manuscript received February 1, 2018; accepted July 2, 2018
国家自然科学基金(51475351, 61471288),陕西省自然科学基金基础研究计划(2015JM5190),陕西省科技统筹创新工程计划项目(2015KTCQ01-97)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (51475351, 61471288), Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province (2015JM5190), and Shaanxi Science and Technology Innovation Project Plan (2015KTCQ01-97)

本文责任编辑 桑农
Recommended by Associate Editor SANG Nong
1. 西安工业大学机电工程学院 西安 710021 2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710049

1. School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021 2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

曼 (Huffman) 公司开发了一种基于二维视觉系统的五轴激光粉末融化焊接系统^[10]. 该系统可以根据被测工件的几何外形如材料的高度、宽度、弯曲度等信息自动生成数控 (Computer numerical control, CNC) 代码, 还可以指导操作人员根据待修复区域信息及时调整输入激光的功率, 以便准确地缺陷区域表面生成金属沉积层. 国内对燃气轮机叶片及航空发动机叶片的缺陷修复研究已经有近 30 年的历史^[11-13], 西安交通大学、中国科学院金属研究所、中航沈阳黎明发动机公司、东方汽轮机公司等单位在该领域都有技术突破, 并且也有应用范例, 其中西安交通大学先进制造研究团队采用激光增材制造 (Laser additive manufacturing) 技术, 通过超声振动辅助激光熔覆沉积对 IN718 沉积态组织与性能的影响研究, 实现了感应辅助激光熔覆沉积 DD4 定向晶来修复 DZ125L 叶片^[14]. 华中科技大学尹周平团队, 基于相邻测轴弹簧模型构造了五轴原位检测路径优化目标函数, 实现了对封闭式叶轮的原位检测^[15]. 尽管国内科研机构取得了一定成果, 但是均为较低端技术, 如: 手工焊接以及半自动焊接等修复工程, 因为缺乏核心技术, 尤其在自动化智能化修复方面的研究与应用, 国内与发达国家相比还有一定差距.

针对零件的表面几何缺陷识别研究, 国内外多集中在基于非接触测量方式如激光扫描法、射线无损检测法以及机器视觉法等研究, Anoshkin 等^[16]利用 X 射线微焦点法对航空产品进行无损检测的优势, 对叶片型面在制造过程中形成的孔隙和裂纹等缺陷特征进行了检测, 取得一定效果. GomATOS II 扫描仪具有较为成熟的光学扫描测量技术, Gao 等^[17]对此进行叶片损伤区域的数据采集及重建研究, 对叶片型面缺陷区域实现了准确识别. 在机器视觉的几何缺陷自动检测方面^[18-19], Ali 等^[20]采用减轻视觉测量系统, 根据基于颜色的跟踪算法, 对齿轮的轮廓进行了精密检测. Mehran 等^[21]开发了一种高效模糊模型, 将视觉技术应用在汽车零部件检测中, 实现了在线检测应用. Jung 等^[22]根据镜头畸变校正和透视畸变校正原理, 采用机器视觉实现对 O 形密封圈尺寸的精确测量. 吴庆华^[23]提出了基于高度颜色映射的三维表面几何缺陷识别方法, 是通过曲线的最近点迭代快速配准来对两幅图像进行色差计算, 来实现对缺陷的识别. 方海燕^[24]在一种新型非正交系坐标测量机的基础上, 提出了使用光学复合式测量球壳内外表面几何缺陷的方法. 该方法将视觉测量的面扫描与激光测量的点扫描相结合, 不仅可以测量表面几何缺陷的覆盖面积和分布, 还可以测量缺陷的深度和宽度. 李文龙等^[25]根据测点分布不均、密度不均、局部缺失等难以克服的测量缺陷, 提出一种基于方差最小化原理的三维匹配数学

建模与计算方法, 解决了匹配目标函数倾向于满足高密度测点或噪音点平方距离最小化的问题, 针对螺旋桨桨叶、曲轴轮廓等检测取得较好效果.

2 基于激光测量的叶片型面检测

2.1 激光传感器采集叶片型面数据

激光位移传感器具有速度快精度高非接触等特性, 有必要采用基于激光等新技术在叶片检测中的研究. 二维激光轮廓测量传感器又称为线扫描激光轮廓测量仪或激光光刀传感器. 传感器的工作原理是基于光学三角法原理, 由半导体激光发生器产生的光束, 经柱面的发射物镜扩散后形成 X 方向的光幕, 照射到被测物体表面上形成一条激光轮廓线, 光线在被测物体表面发生漫反射, 经激光 2D 接收透镜组采集从被测物体表面反射回来的光束, 并将其投影在一个二维 CCD 面阵上, 形成被测物体的剖面图形, 利用基准面、像点、像距等几何关系, 再通过高速信号处理器分析计算, 就可以分别获得被测轮廓线的宽度与高度, 即被测工件表面信息的三维坐标点 X, Y, Z 值. 结合二维激光轮廓传感器在坐标系统上 X, Y, Z 三维方向的位移量, 最终可以得到被测物体表面的三维轮廓信息. 图 1 是二维激光轮廓测量传感器原理图.

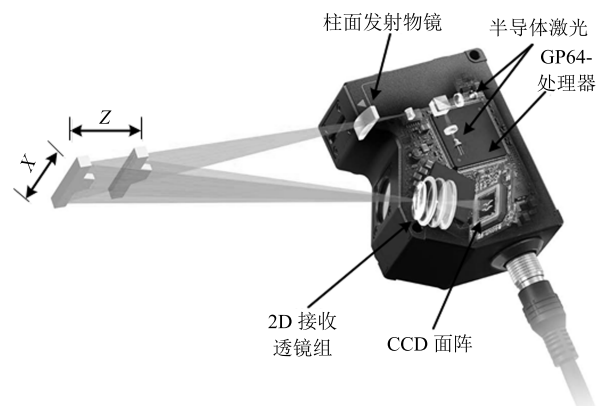


图 1 二维激光轮廓传感器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of 2D laser profile sensor

为了能够实现对叶片型面的三维进行测量, 课题设计了基于激光的叶片型面测量坐标系统^[26-27]. 叶片型面经测量系统快速扫描, 获得海量点云数据, 由于测量系统的数据是三维结构, 数据量非常庞大, 根据被测叶片大小不同, 采样数据有几十万到上百万之多, 这些数据中包含了叶片型面的几何缺陷信息, 如何通过合适的算法分辨出叶片型面的缺陷信息, 是论文要研究的重要内容之一.

2.2 基于截面线的一阶导矢算法

由曲线的几何学理论可知, 如果曲线端点的导

矢发生改变, 该曲线将出现不光顺区域即其形状发生了较大的变化. 通常曲线的不光顺情况, 由其上不光顺点的分布可以分为连续“坏点”和散落“坏点”两大类情况. 在曲线光顺前, 先计算出曲线各端点导矢, 找到“坏点”邻域的型值点, 通过构建辅助曲线, 就可以识别出曲线中部分连续的“坏点”.

定义曲线的型值点为

$$\{B_k\}, k = 0, 1, \dots, n \quad (1)$$

假设 D_0 和 D_n 是曲线首尾两个端点的一阶导矢. 根据曲线拟合理论, 把型值点通过插值函数拟合为一条 NURBS 曲线

$$C(u) = \sum_{i=0}^{n+2} N_{i,p}(u)P_i, \quad U = \underbrace{\{0, \dots, 0\}}_{p+1}, \underbrace{\{u_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}\}}_{p+1}, \underbrace{\{1, \dots, 1\}}_{p+1} \quad (2)$$

式中, P_i 为控制点, 型值点 C_k 对应的参数值 \bar{u}_k 要用弦长参数化法来计算出, 再通过平均值法来确定节点矢量 U , 基函数被求出之后, 将其和型值点代入下式计算

$$B_k = C(\bar{u}_k) = \sum_{i=0}^{n+2} N_{i,p}(\bar{u}_k)P_i \quad (3)$$

式 (3) 建立的线性方程组是以控制点 P_i 为未知量的. 式中有 $n + 1$ 个方程和 $n + 3$ 个未知控制点, 因此上述方程属于超静定方程, 解此方程必须再建立另外两个方程. 从首末端点的一阶导矢 D_0, D_n 和相邻两个控制顶点 P_0, P_1 和 P_{n+1}, P_{n+2} 的数学关系可以得到:

$$-P_0 + P_1 = \frac{u_{p+1}}{p}D_0 \quad (4)$$

$$-P_{n+1} + P_{n+2} = \frac{1 - u_{m-p-1}}{p}D_n \quad (5)$$

将以上两个方程与式 (2) 联立, 可以得到一个系数矩阵为 $(n + 3) \times (n + 3)$ 的线性方程组, 那么解这个方程组, 就可以求得 $n + 3$ 个控制顶点的坐标. 已知 P_i 的坐标是三维结构, 因此需要求解三个这样的线性方程组才能求出控制点 P_i . 通过以上理论的推导, 进行曲线不光顺即曲面缺陷区域识别时, 需要首先确定曲面待光顺的区域. 根据课题要求, 叶片型面测量系统的精度为 $2 \mu\text{m}$, 那么规定不光顺的点是曲线拟合时与曲线的距离大于 $3 \mu\text{m}$ 的型值点. 根据航发叶片截面线的设计特征, 叶背和叶盆曲线上曲率发生突变的型值点就是不光顺的点. 因此通过上面所述公式, 截面曲线上所有测点的曲率先被求出, 那么“连续坏点”的区域就是曲率图中曲率变化频繁的区域. 针对叶片型面特征, 把测量点云分为

叶身的叶盆和叶背两部分点云数据, 由叶片设计概念可知, 其截面型线在叶盆和叶背两端内均匀光滑连续只有一个拐点, 由这一特征出发, 以叶盆或叶背为对象进行分析. 首先将测量点云以等高法截取截面点云, 如图 2 所示, 通过 B 样条插值函数拟合成光滑曲线.

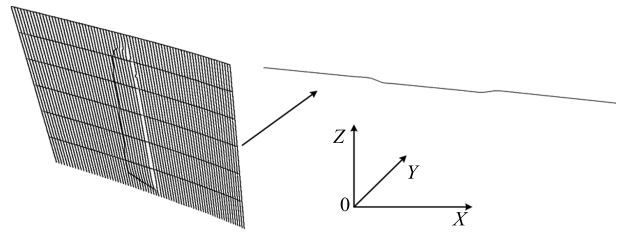


图 2 叶片叶盆测量点云的截面拟合曲线

Fig. 2 Cross section fitting curve of measuring point cloud in leaf vane

$$P'(u) = p \sum_{i=0}^{n-1} N_{i+1,p-1}(u) \frac{P_{i+1} - P_i}{u_{i+p+1} - u_{i+1}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

此处取样条曲线次数为 2, 式 (6) 可推导为

$$P'(u) = -2(1-u)P_0 + 2(1-2u) \times \frac{-(1-u)^2P_0 + P_1 - u^2P_2}{2u(1-u)} + 2uP_2 \quad (7)$$

其中, $P_0(x_0, y_0, z_0), P_1(x_1, y_1, z_1), P_2(x_2, y_2, z_2)$ 为曲线中相邻的三个测量点, 参数 u 可由式 (8) (见下页上方) 计算出.

式 (8) 中, 曲线首尾两个端点 D_0 和 D_n 的一阶导矢为

$$D_0 = f'_+(P_0) = \begin{cases} \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{C(P_{0x+\Delta x}) - C(P_{0x})}{\Delta x} \\ \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{C(P_{0y+\Delta y}) - C(P_{0y})}{\Delta y} \\ \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{C(P_{0z+\Delta z}) - C(P_{0z})}{\Delta z} \end{cases} \quad (9)$$

$$D_n = f'_-(P_n) = \begin{cases} \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{C(P_{nx+\Delta x}) - C(P_{nx})}{\Delta x} \\ \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{C(P_{ny+\Delta y}) - C(P_{ny})}{\Delta y} \\ \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{C(P_{nz+\Delta z}) - C(P_{nz})}{\Delta z} \end{cases} \quad (10)$$

式中, C 为插值函数, P_{0x}, P_{0y}, P_{0z} 为端点 P_0 在直角坐标系下的分量, P_{nx}, P_{ny}, P_{nz} 为端点 P_n 在直角坐标系下的分量.

$$u = \frac{\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2}}{\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2} + \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}} \quad (8)$$

根据式(9)和式(10)先求出测点一阶导数,再由点斜公式可以求出曲线上各个测量点的切线.将所有测点的曲线绘制在一个平面上,如图3所示,深色为截面型线拟合曲线,浅色为曲线上测点的切线.假设曲线光滑连续,那么曲线上所有测点的切线斜率将在两端点斜率值之间变化,否则表明曲线上有几何缺陷存在.根据k-d树最近点搜索算法^[28],遍历整个叶盆(叶背)上的截面型线,就可以找到叶盆(叶背)上的几何缺陷区域.

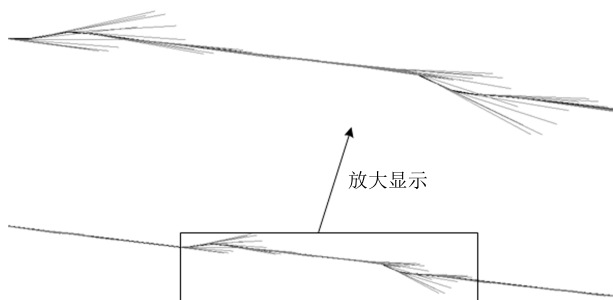


图3 截面型线测点的切线分布及局部放大图

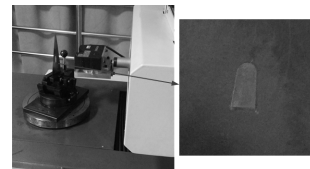
Fig.3 Tangent distribution and partial enlargement of measuring points of section lines

3 实验验证

实验时,由于激光位移传感器的信号采样中,通常伴随有其他的噪声干扰,包括环境光、电涌电流、镜面反射、表面反射吸收等造成的噪音点.这些毛刺信号对后续的数据处理有着较大的影响,为了提高叶片型面缺陷识别的准确性,必须对采样的信号进行滤波去噪平滑处理.滤波的目的主要是为了剔除坏点、使测量点云能够平滑过度.针对有序排列的点云数据,本文通过高斯滤波算法对传感器的初始采样数据进行滤波处理,取得较好效果.

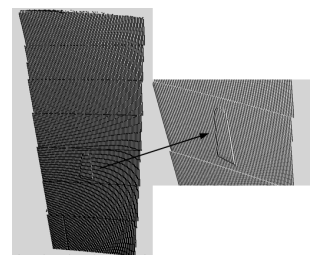
为了能够验证本文方法的正确性,实验把厚0.1 mm的塞尺片,沾在完好叶片型面的叶盆上,如图4所示,先用课题研制的四坐标叶片型面激光测量系统进行扫描检测.由于粘贴存在间隙,实际高度已大于塞尺自身厚度,故采用了精度更高的Hexagon SR575(测量范围:50 mm × 700 mm × 500 mm;系统精度 ≤ 1.9 μm)三坐标测量机对塞尺同一截面进行测量验证.通过对二者所测量的数据计算分析,由表1可以看到,二者的测量数据比较接近.由于表面几何缺陷区域较小,测量系统的动态误差影响可以忽略,那么对缺陷识别的精度可以认为是激光传感器的测量精度.采用上面提出的表面几

何缺陷识别算法,课题研制的激光测量系统对缺陷区域识别范围,在深度方向可以达到1 μm,即二维激光传感器的Z向测量精度,宽度由测量系统的采样间距决定,原则上只要激光传感器的扫描密度足够密,就可以达到较高的测量精度.



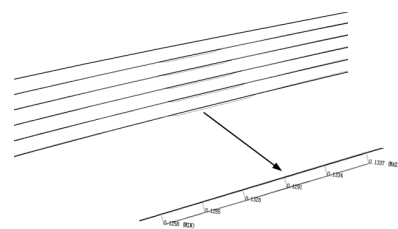
(a) 激光传感器在坐标测量系统上测量缺陷叶片

(a) Laser sensor for measuring defective blades on coordinate measuring system



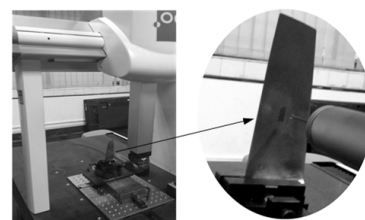
(b) 测量后的数据点云

(b) Data point cloud after measurement



(c) 对叶片缺陷进行识别、分析和计算

(c) Identification, analysis and calculation of blade defects



(d) 三坐标测量机检测并计算缺陷

(d) CMM detects and calculates defects

图4 激光测量系统与三坐标检测叶片表面缺陷比对实验
Fig.4 Laser measurement system and three-coordinate detection blade surface defect comparison experiment

表 1 对叶片表面几何缺陷同一截面进行检测 (mm)

Table 1 Detecting the same section of the geometrical defect of the blade surface (mm)

检测装置	最大值	最小值
激光测量系统	0.1337	0.1258
三坐标测量机	0.1369	0.1252
误差	0.0032	0.0006

4 结束语

随着技术的不断进步, 航空发动机性能的愈来愈高, 针对叶片型面的检测效率和检测精度需求也越来越高. 论文针对航空叶片修复检测的应用, 提出了一种基于截面线一阶导矢法的叶片型面缺陷识别方法. 该方法是以等高线法处理测量点云中的截面数据, 通过 B 样条插值函数拟合光滑曲线; 再由 B 样条曲线的一阶导矢公式求出每个测点的一阶倒数, 然后以点斜公式求出截面曲线上各个测点的切线; 如果曲线光滑, 曲线上测点的斜率变化在两端点斜率值之间, 否则表明曲线上有缺陷存在; 根据 $k-d$ 树的最近点搜索算法, 遍历整个叶盆 (叶背) 就可以找到叶盆 (叶背) 上的缺陷区域. 最后通过与高精度三坐标的实验比对, 结果表明本方法的可靠性, 对目前叶片型面的加工检测以及修复检测都具有一定的指导和应用价值.

References

- Soares C. Gas turbine major components and modules. *Gas Turbines: A Handbook of Air, Land, and Sea Applications*. Butterworth: Butterworth-Heinemann, 2008. 119–166
- Kauser F B. An overview of gas turbine propulsion technology. In: Proceedings of the 30th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Indianapolis, IN, USA, 1994.
- Yin Pei-Li, Wang Jian-Hua, Chen Yang-Quan, Wang Fei-Yue. Parallel measurements: a new theory and framework for complex measurement system and a case study. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(3): 425–433
(尹培丽, 王建华, 陈阳泉, 王飞跃. 平行测量: 复杂测量系统的一个新型理论框架及案例研究. 自动化学报, 2018, **44**(3): 425–433)
- Meng Biao, Qu Xue-Jun. Global calibration and multi-view data fusion for combination measurement system of large complicate shapes. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(11): 2051–2060
(孟飙, 曲学军. 大尺寸复杂形状组合测量系统的全局标定与多视图数据融合. 自动化学报, 2017, **43**(11): 2051–2060)
- Wu H D, Gao J, Li S, Zhang Y H, Zheng D T. A review of geometric reconstruction algorithm and repairing methodologies for gas turbine components. *TELKOMNIKA*, 2013, **11**(3): 1609–1618
- Bin S, Bing L. Laser displacement sensor in the application of aero-engine blade measurement. *IEEE Sensors Journal*, 2016, **16**(5): 1377–1384
- Mohaghegh K, Sadeghi M H, Abdullah A, Boutorabi R. Improvement of reverse-engineered turbine blades using construction geometry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, **49**(5–8): 675–687
- Giannakoglou K C, Giotis A P, Karakasis M K. Low-cost genetic optimization based on inexact pre-evaluations and the sensitivity analysis of design parameters. *Inverse Problems in Engineering*, 2001, **9**(4): 389–412
- Angelastro A, Campanelli S L, Casalino G. Statistical analysis and optimization of direct metal laser deposition of 227-F Colmonoy nickel alloy. *Optics and Laser Technology*, 2017, **94**: 138–145
- Blokhina I. Investigation of surfaced press molds made its working resource. *Technology Audit and Production Reserves*, 2017, **3**(1): 34–38
- Xi Ping, Sun Xiao-Xia. 3D solid reconstruction and error inspection of big-twisted turbo blade. *Journal of Engineering Graphics*, 2009, **30**(3): 1–5
(席平, 孙肖霞. 大扭曲度涡轮叶片的三维实体重构与误差检测. 工程图学学报, 2009, **30**(3): 1–5)
- Lin Xiao-Jun, Yang Kuo, Wu Guang, Dong Ting. NC polishing programming technology of open blisk blade surface. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, **20**(2): 379–384
(蔺小军, 杨阔, 吴广, 董婷. 开式整体叶盘叶片型面数控抛光编程技术. 计算机集成制造系统, 2014, **20**(2): 379–384)
- Cheng Yun-Yong, Zhu Zhen-Zhen, Li Wei-Liang, Zhang Ding-Hua. Measurement sampling method oriented to blade bending and torsion deformation analysis. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2013, **19**(6): 1329–1335
(程云勇, 朱真真, 李维亮, 张定华. 面向叶片弯曲扭变形分析的测量采样方法. 计算机集成制造系统, 2013, **19**(6): 1329–1335)
- Zhang An-Feng, Li Di-Chen, Liang Shao-Duan, Wang Tan, Yan Shen-Ping, Zhang Lian-Zhong. Development of laser additive manufacturing of high-performance metal parts. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, **59**(22): 16–22
(张安峰, 李涤尘, 梁少端, 王潭, 严深平, 张连重. 高性能金属零件激光增材制造技术研究进展. 航空制造技术, 2016, **59**(22): 16–22)
- Li Wen-Long, Wang Gang, Yin Zhou-Ping. 5-axis onsite inspection path generation and experimental verification of enclosed impeller. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, **39**(3): Article No. 42147
(李文龙, 王刚, 尹周平. 闭式叶轮五轴原位检测路径规划与实验验证. 航空学报, 2018, **39**(3): Article No. 42147)
- Anoshkin A N, Osokin V M, Tretyakov A A, Potrakhov N N, Bessonov V B. Application of operational radiographic inspection method for flaw detection of blade straightener from polymeric composite materials. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, **808**(1): Article No. 012003
- Gao J, Chen X, Yilmaz O, Gindy N. An integrated adaptive repair solution for complex aerospace components through geometry reconstruction. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, **36**(11–12): 1170–1179
- Luo Jing, Dong Ting-Ting, Song Dan, Xiu Chun-Bo. A review on surface defect detection. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2014, **8**(9): 1041–1048
(罗菁, 董婷婷, 宋丹, 修春波. 表面缺陷检测综述. 计算机科学与探索, 2014, **8**(9): 1041–1048)

- 19 Shang Yan-Yan. The Application Research of Reverse Engineering in Engine Blade Reconstruction and Detection [Master thesis], Shaanxi University of Science and Technology, China, 2014.
(上燕燕. 逆向工程在发动机叶片重构及检测中的应用研究 [硕士学位论文], 陕西科技大学, 中国, 2014.)
- 20 Ali M H, Kurokawa S, Uesugi K. Application of machine vision in improving safety and reliability for gear profile measurement. *Machine Vision and Applications*, 2014, **25**(6): 1549–1559
- 21 Mehran P, Demirli K, Surgenor B. Fuzzy machine vision based clip detection. *Expert Systems*, 2013, **30**(4): 352–366
- 22 Jung Y S, Park K H. O-ring size measurement based on a small machine vision inspection equipment. *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, 2014, **19**(4): 41–52
- 23 Wu Qing-Hua. Study on Theory and Application of 3D Surface Defect On-line Detecting Based on Line-structured Light Scanning [Ph.D. dissertation], Huazhong University of Science and Technology, China, 2013.
(吴庆华. 基于线结构光扫描的三维表面缺陷在线检测的理论与应用研究 [博士学位论文], 华中科技大学, 中国, 2013.)
- 24 Fang Hai-Yan. Study on Key Technology of Non-orthogonal and Noncontact Coordinate Measuring Machine [Ph.D. dissertation], Xi'an University of Technology, China, 2005.
(方海燕. 非正交系非接触坐标测量机关键技术研究 [博士学位论文], 西安理工大学, 中国, 2005.)
- 25 Li Wen-Long, Xie He, Yin Zhou-Ping, Ding Han. Mathematical modeling and error analysis of 3d matching based on variance minimization principle. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, **53**(16): 190–198
(李文龙, 谢核, 尹周平, 丁汉. 基于方差最小化原理的三维匹配数学建模与误差分析. 机械工程学报, 2017, **53**(16): 190–198)
- 26 Li Bing, Sun Bin, Chen Lei, Wei Xiang. Application of laser displacement sensor to free-form surface measurement. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(7): 1939–1947
(李兵, 孙彬, 陈磊, 魏翔. 激光位移传感器在自由曲面测量中的应用. 光学精密工程, 2015, **23**(7): 1939–1947)
- 27 Sun B, Li B. A rapid method to achieve aero-engine blade form detection. *Sensors*, 2015, **15**(6): 12782–12801
- 28 Liu Yu, Xiong You-Lun. Algorithm for searching nearest-neighbor based on the bounded k-d tree. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2008, **36**(7): 73–76
(刘宇, 熊有伦. 基于有界 k-d 树的最近点搜索算法. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2008, **36**(7): 73–76)



孙彬 西安工业大学机电工程学院讲师. 2016 年获得西安交通大学仪器科学与技术博士学位. 主要研究方向为几何量精密测量理论研究及工程应用. 本文通信作者. E-mail: sun075634@163.com

(**SUN Bin** Lecturer at the College of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Technological University. He received his Ph.D. degree in instrument science and technology from Xi'an Jiaotong University in 2016. His research

interest covers geometric measurement theory research and engineering application. Corresponding author of this paper.)



王建华 西安工业大学机电工程学院教授. 1991 年获得西安交通大学机械工程系博士学位. 主要研究方向为计算机辅助精密测量.

E-mail: wjh-xagd@vip.163.com

(**WANG Jian-Hua** Professor at the School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University. He received his Ph.D. degree from Xi'an Jiaotong University in 1991. His main research interest is computer aided precision measurement.)



赫东锋 西安工业大学机电工程学院副教授. 2000 年获得西安工业大学机械制造及其自动化专业硕士学位. 主要研究方向为精密测量技术和智能机械.

E-mail: dongfenghe@163.com

(**HE Dong-Feng** Associate professor at the School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University. He received his master degree from Xi'an Technological University in 2000. His research interest covers precision measurement technology and intelligent machine.)



杜虎兵 西安工业大学机电工程学院副教授. 2013 年获得西安交通大学仪器科学与技术专业博士学位. 主要研究方向为机器视觉, 三维轮廓测量.

E-mail: duhubing@xatu.edu.cn

(**DU Hu-Bing** Associate professor at the School of Mechanical and Electrical Engineering. He received his Ph.D. degree in instrument science and technology from Xi'an Jiaotong University in 2013. His research interest covers machine vision and 3D profile measurement.)



李兵 西安交通大学机械系统工程国家重点实验室教授. 2004 年获得西安交通大学博士学位. 主要研究方向为光电检测及精密测试技术.

E-mail: lb@mail.xjtu.edu.cn

(**LI Bing** Professor at the State Key Laboratory of Mechanical Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University. He received his Ph.D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2004. His research interest covers photoelectric detection and precision testing technology.)